

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Jure Josip Cicvarić**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

Izv.prof.dr. sc. Aleksandar Sušić, dipl. ing.

Student:

Jure Josip Cicvarić

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Jure Josip Cicvarić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Jure Josip Cicvarić** Mat. br.: 0035190697

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza biomehanike koljena u sportskim kretnjama**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of Knee Biomechanics in Sports Movements**

Opis zadatka:

Ozljede (sportske) koljena vrlo su česte, te u mnogim slučajevima rezultiraju nužnošću operativnih zahvata, pa čak i zamjenom čitavog zgloba umjetnim. Iako su razlozi brojni i raznoliki, uzrok ovih ozljeda najčešće se krije u narušenoj stabilnosti koljena odnosno nametnutim biomehaničkim uvjetima koje strukture koljena nisu u mogućnosti podnijeti. Naravno, mjere prevencije i odgovarajuće pripreme za sport svakako su jedna od strategija, međutim, nisu uvijek i dostatne. Svaki doprinos spoznajama kao i poboljšavanjem sportske obuke i opreme mogu igrati značajnu ulogu u prevenciji i zaštiti od ozljeda, pa je to i motiv ove teme.

U okviru rada je potrebno:

- približiti probleme i etiologiju sportskih ozljeda koljena uz osvrt na funkcionalnost zgloba,
- prikazati specifične kretnje u sportu i posljedične ozljede,
- izabrati jednu od najčešćih ozljeda i za nju izvršiti biomehaničku analizu,
- utvrditi kritične parametre kao smjernice za prevenciju od ozljeda,
- na temelju utvrđenih smjernica predložiti koncept preventivnog rješenja ili korekciju pokreta.

Opseg biomehaničke analize, modeliranja i izrade dokumentacije dogovoriti tijekom izrade rada. Svu dokumentaciju izraditi pomoću računala. U radu navesti korištenu literaturu, kao i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Rok predaje rada:

1. rok: 23. veljače 2018.  
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.  
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.  
2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.  
3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Izv.prof.dr.sc. Aleksandar Sušić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Batan

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. ANATOMIJA KOLJENA .....	2
2.1.  Kosti u zglobu koljena .....	2
2.1.1.  Bedrena kost ili femur.....	2
2.1.2.  Goljenična kost ili tibia .....	4
2.1.3.  Iver ili patela .....	6
2.2.  Ligamenti u koljenu .....	7
2.2.1.  Križni ligamenti .....	7
2.2.2.  Kolateralni ligamenti .....	8
2.2.3.  Meniskusi .....	9
2.2.4.  Patelarni ligament .....	10
2.3.  Mišići koji utječu na rad koljena.....	11
2.4.  Zglob koljena .....	12
3. SPORTSKE OZLJEDE KOLJENA .....	15
3.1.  Unutarnji i vanjski uzroci ozljeda .....	15
3.1.1.  Vanjski uzroci .....	15
3.1.2.  Unutarnji uzroci .....	16
3.2.  Najčešće ozljede koljena u sportu .....	18
3.2.1.  Ozljeda prednjeg križnog ligamenta .....	18
3.2.2.  Ozljeda stražnjeg križnog ligamenta.....	19
3.2.3.  Ozljeda meniskusa .....	20
3.2.4.  Ozljeda kolateralnih ligamenata .....	21
4. BIOMEHANIČKA ANALIZA OZLJEDE PREDNJEG KRIŽNOG LIGAMENTA U ALPSKOM SKIJANJU .....	23
4.1.  Puknuće prednjeg križnog ligamenta izazvano slip-catch mehanizmom .....	23
4.2.  Biomehanička analiza Slip-catch mehanizma.....	24
4.3.  Utjecaj skijaške opreme na clip-catch mehanizam .....	26
4.3.1.  Utjecaj skija .....	26
4.3.2.  Utjecaj vezova.....	27
5. KONCEPTUALNO RJEŠENJE ZA PREVENCIJU OZLJEDE PREDNJEG KRIŽNOG LIGAMENTA SLIP-CATCH MEHANIZMOM .....	29
5.1.1.  Skijaški mehatronički sustav.....	29
6. ZAKLJUČAK.....	32
7. LITERATURA .....	34

## POPIS SLIKA

Slika 1. Razlika između kortikalnog i trabekularnog koštanog tkiva [3] .....	2
Slika 2. Bedrena kost [5] .....	3
Slika 3. Pogled na distalni dio femura: a) sprijeda, b) odostraga. [4] .....	4
Slika 4. Goljenična kost ili tibia [6] .....	5
Slika 5. Pogled odozgo na proksimalni dio goljenične kosti [7].....	6
Slika 6. Iver ili petela [8].....	7
Slika 7. Ligamenti u koljenu [9].....	8
Slika 8. Meniskusi [10] .....	9
Slika 9. Patelarni ligament [11] .....	10
Slika 10. Mišićne skupine koje utječu na rad koljena [12] .....	11
Slika 11. Zglob koljena [14].....	13
Slika 12. Zglob koljena [15].....	13
Slika 13. Klizanje femura po tibiji [16].....	14
Slika 14. Raspon fleksije i ekstenzije koljena [17] .....	14
Slika 15. Puknuće prednjeg križnog ligamenta: a) bez vanjske sile, b) uz vanjsku silu .....	18
Slika 16. Puknuće prednjeg križnog ligamenta kao posljedica hiperekstenzije koljena [20] ..	19
Slika 17. Mehanizmi puknuća stražnjeg križnog ligamenta [2].....	20
Slika 18. Ozljeđa meniskusa u američkom nogometu [21].....	21
Slika 19. Puknuće kolateralnog ligamenta u američkom nogometu [22] .....	22
Slika 20. Slip-catch mehanizam ozljede [25] .....	24
Slika 21. Slip-catch mehanizam ozljede [26] .....	24
Slika 22. Sila reakcije površine na rep skije [26] .....	25
Slika 23. Sila reakcije površine na skiju koja uzrokuje momente u koljenu [26] .....	25
Slika 24. Izgled modernih carving skija [27] .....	26
Slika 25. Dijagram ozljeda u skijanju kroz godine [28].....	27
Slika 26. Mehanizam otpuštanja skijaških vezova [28] .....	28
Slika 27. Položaji senzora u konceptualnom skijaškom mehatroničkom sustavu .....	29
Slika 28. Algoritam regulacije za skijaški mehatronički sustav.....	30

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Usporedba spolova za puknuće prednjeg križnog ligamenta po različitim sportovima [18] .....	17
--	----

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$F_R$	N	Reaktivna sila površine na skiju
$l_{GR}$	M	granični razmak između koljena
$M_{gGR}$	Nmm	granični moment u gležnju
$M_{kGR}$	Nmm	granični moment u koljenu
$M_x$	Nmm	Moment oko x osi koljena
$M_z$	Nmm	Moment oko uzdužne osi tibije
$S_1$	mm	Udaljenost između reaktivne sile i uzdužne osi tibije
$S_2$	mm	Udaljenost između reaktivne sile i koljena
$\alpha_{GR}$	°	Granični kut između femura i tibije



## SAŽETAK

U okviru ovog rada, nastoje se opisati ozljede koljenog zgloba koje se javljaju kao posljedica sportskih i rekreativnih aktivnosti. Kako bi se što bolje razumijele ozljede, prvotno je opisana anatomska građa koljenog zgloba. U koljenu se uzglobljuju tri kosti: femur, tibija i patela. Za stabilnost zgloba najviše su zaslužni ligamenti, dok meniskusi pravilno raspodjeljuju tlak u zglobu i smanjuju vibracije nastale kretanjem. Mišići ostvaruju kretanje zgloba koljena, a najvažniji pokreti koljena jesu fleksija i ekstenzija. U danjem toku analize opisani su unutarnji i vanjski uzroci koji bitno utječu na povećanje rizika od ozljeda. Kao glavni unutarnji uzroci istaknuti su biološka i anatomska građa pojedinca, razlike između spolova, stupanj razvoja adolescenata, te kvaliteta treninga. Glavni vanjski uzroci koji utječu na povećanje rizika od ozljede jesu okolina u kojoj se pojedinac nalazi i oprema koju pojedinac koristi tijekom rekreacije ili bavljenja sportom. Nadalje su istaknute karakteristične ozljede koljena prilikom sportskih kretnji. Puknuće prenjeg križnog ligamenta najčešće je posljedica unutarnje rotacije tibije u kombinaciji s valgus rotacijom ili hiperekstenzije koljena. Stražnji križni ligament najčešće strada uslijed posteriorno usmjerene sile na tibiju. Do puknuća kolateralnih ligamenata dolazi zbog iznenadne sile koja na koljeno djeluje s lateralne ili medijalne strane te uzrokuje valgus ili varus rotaciju. Ozljede meniskusa nastupaju nakon rotacije dok je koljeno u fleksiji ili ekstenziji. Za detaljniju biomehaničku analizu odabrana je ozljeda prednjeg križnog ligamenta u alpskom skijanju, koja se odvija po Slip-catch mehanizmu. U trenutku koji prethodi ozljedi, skijaš gubi ravnotežu i kontakt donje skije s površinom. U želji za ponovom uspostavom kontakta, skijaš ispružuje koljeno čime skija bježi od centra mase tijela. U trenutku kada rep skije naglo uspostavi kontakt s površinom, dolazi do snažne reaktivne sile na rep skije, koja prouzročuje unutarnju rotaciju tibije i valgus rotaciju. Posljedica je puknuće prednjeg križnog ligamenta u koljenu. Analizom je prikazano kako su glavni uzroci ozljede ispruženo koljeno, parabolični oblik modernih carving skija i skijaški vezovi. Kao moguće rješenje problema, u zadnjem je poglavlju opisan koncept mehatroničkog skijaškog sustava. Prikazana su mjesta postavljanja senzora momenata, položaja i kuta, te je na temelju prethodne analize izrađen algoritam regulacije.

Ključne riječi: koljeno, biomehanika, puknuće prednjeg križnog ligamenta, alpsko skijanje

## **SUMMARY**

In this paper, the aim is to describe knee injuries occurring as a result of sports and recreational activities. In order to better understand the injuries, anatomy of the knee is firstly described. Three bones are connected in the knee: femur, tibia and patel. For joint stability, ligaments are most important, while the meniscus correctly distribute pressure on the joint and reduce vibrations caused by movement. The muscles make the movement of the knee joint, and the most important knee movements are flexion and extension. Through further analysis, internal and external causes that significantly affect the risk of injuries are described. The main internal causes are the biological and anatomical nature of the individual, the differences between the sexes, the degree of adolescent development, and the quality of the training. The main external causes that increase the risk of injuries are the environment and the equipment that an individual uses during recreation or sport. In addition, characteristic knee injuries that occur during sporting movements were described. Tear of the anterior cruciate ligament is the most common consequence of internal rotation of the tibia in combination with valgus rotation or hyperextension of the knee. The posterior cruciate ligament is most often injured due to the posteriorly directed force on the tibia. The collapse of the collateral ligaments occurs due to the sudden force acting on the knee of the lateral or medial side and causing valgus or varus rotation. Meniscus injuries occur after rotation while the knee is in flexion or extension. Anterior cruciate ligament injury in alpine skiing caused by the Slip-catch mechanism is taken for more detailed biomechanical analysis. Before injury, the skier loses balance and loses contact with the surface. In the desire to reestablish the contact, the skier extends the knee so that the ski runs away from the center of the body mass. When a ski tail suddenly establishes contact with the surface, a powerful reactive force on the tail is produced, causing the internal rotation of the tibia and valgus rotation. The consequence is the collapse of the anterior cruciate ligament in the knee. The analysis shows that the main causes of injury are extended knee, parabolic form of modern carving skis and ski bindings. As a possible solution to the problem, the last chapter describes the concept of the mechatronic ski system. The positions of the moment sensors, the position sensors and the angle sensors are displayed, and based on the previous analysis, a regulation algorithm was created.

Key words: knee, biomechanics, ACL rupture, alpine skiing

## **1. UVOD**

Koljeno je najsloženiji i najveći pokretni zglob u ljudskom tijelu. Ono povezuje natkoljenicu s potkoljenicom i ima najvažniju ulogu u prenošenju težine tijela u horizontalnom smjeru hodanjem ili trčanjem, te u vertikalnom smjeru skakanjem. U sebi uzgobljuje tri kosti: femur, tibiju i patelu. Stabilnost mu u velikoj mjeri ovisi o ligamentima čija je zadaća povezati kosti u zglobu, osigurati stabilnost zgloba, te spriječiti prekomjerno gibanja zgloba. Za fleksiju i ekstenziju koljena, kao i za dinamičku stabilizaciju, zadužene su mišićne skupine koje se nalaze oko zgloba koljena. Ako dođe do disfunkcije bilo koje od navedenih struktura, funkcionalnost zgloba postaje upitna. Disfunkcija može nastati na različite načine, a za koljeno je jedan od najčešćih načina sportska ozljeda.

U okviru ovog rada, sagledat će se najčešći uzroci odgovorni za sportske ozljede koljena, prikazati najčešće sportske ozljede koljena te načini na koje one nastaju.

Navedeni problemi, predmet i cilj istraživanja, nametnuli su potrebu da se tematika ovog završnog rada kojemu je naslov Analiza biomehanike koljena u sportskim kretnjama, sustavno prezentira u pet međusobno povezanih poglavlja.

## 2. ANATOMIJA KOLJENA

Koljeno je najveći pokretni zglob u ljudskom tijelu. U njemu se uzglobljuju 3 kosti, a stabilnost mu u najvećoj mjeri ovisi o ligamentima. [1], [2]

### 2.1. Kost u zglobu koljena

Zglob koljena je formiran između dviju glavnih dugih kosti u donjem predjelu ljudskog tijela, goljenične kosti ili tibije, koja se proteže između zgloba koljena i zgloba gležnja, i bedrene kosti ili femura, koja leži između zgloba koljena i zgloba kuka. Treća prisutna kost u koljenu je Iver ili patela. [1]

Iako lisna kost ili fibula utječe na rad zgloba gležnja, ona ne utječe na rad zgloba koljena. [2]

#### 2.1.1. Bedrena kost ili femur

Bedrena kost je jedina kost u predjelu natkoljenice, a nalazi se između zgloba koljena i zgloba kuka. Ona je najduža kost u ljudskom tijelu, te spada u skupinu dugih kostiju. Mehanička svojstva kostiju najviše ovise o njihovoj strukturi, odnosno o omjeru kortikalnog koštanog tkiva i trabekularnog koštanog tkiva. [2]



Slika 1. Razlika između kortikalnog i trabekularnog koštanog tkiva [3]

Dijafiza je središnji šuplji dio kosti, unutar kojeg je smještena medularna šupljina ispunjena žutom koštanom srži. Ona služi kao zaliha energije u obliku masnoća. Vanjski dio dijafize je građen od kortikalnog koštanog tkiva. Kortikalno koštano tkivo je gusto i čvrsto koštano tkivo, građeno od snopova osteona usmjerenih u smjeru uzdužne osi kosti, pa je primarna zadaća izdržati tlačne sile.[4]

Dva ekstremiteta na krajevima femura se nazivaju epifize. Epifiza je izvana građena od kortikalnog koštanog tkiva, a iznutra je ispunjena spužvastim ili trabekularnim koštanim tkivom. Trabekularno koštano tkivo je građeno od rešetkasto postavljenih gredica koje se nazivaju trabekule. Grede su postavljene u smjeru naprezanja. Takva struktura osigurava čvrstoću kosti, uz smanjenu težinu na krajevima.[4]

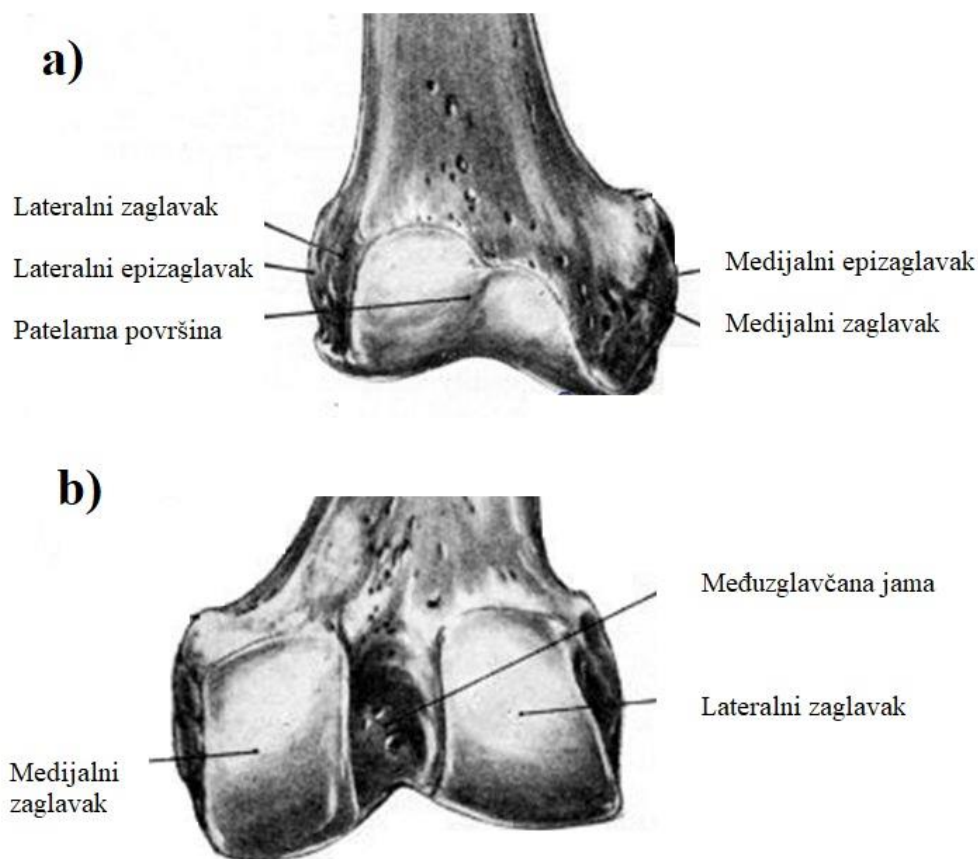
Bedrenu kost možemo podijeliti na tri dijela:

- Gornji kraj,
- Vrat,
- Donji kraj.



**Slika 2. Bedrena kost [5]**

Sastavni dio zgloba koljena je donji ili distalni kraj bedrene kosti. Distalni kraj bedrene kosti završava s dva zaglavka, medijalnim i lateralnim zaglavkom. Između njih je, gledano iz stražnjeg pogleda, smještena međuzglavčana jama. [4]



**Slika 3. Pogled na distalni dio femura: a) sprijeda, b) odostraga. [4]**

U pogledu sprijeda, zaglavci su malo istaknutiji u odnosu na ostatak kosti, a odvojeni su glatkom plitkom zglobovom depresijom koja se naziva patelarna površina. U pogledu odostraga, medijalni i lateralni zaglavak odvaja međuzglavčana jama. Svaki zaglavak nadvise uzvisina nazvana epizaglavak (epicondyle) koja služi za povezivanje femura s tibiom i fibulom ligamentima. [4]

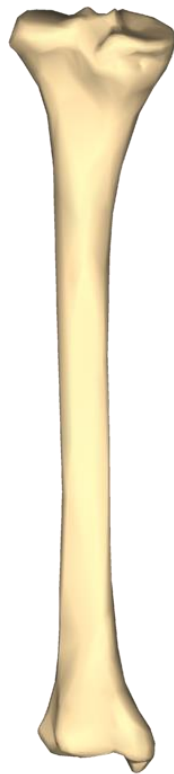
### **2.1.2. Goljenična kost ili tibia**

Goljenična kost ili tibia jedna je od dvije kosti prisutnih u predjelu od zgloba koljena do gležnja. Tibia se nalazi na medijalnoj strani noge, a u odnosu na fibulu, bliža je sagitalnoj ravnini. [2], [4]

Kao i bedrena kost, goljениčna kost spada u skupinu dugih kosti. Središnji dio kosti koji je izvana građen kortikalnim koštanim tkivom, a iznutra je ispunjen žutom koštanom srži naziva se dijafiza, a dva ekstremiteta, epifize, izvana su građene kortikalnim, a iznutra trabekularnim koštanim tkivom. [2], [4]

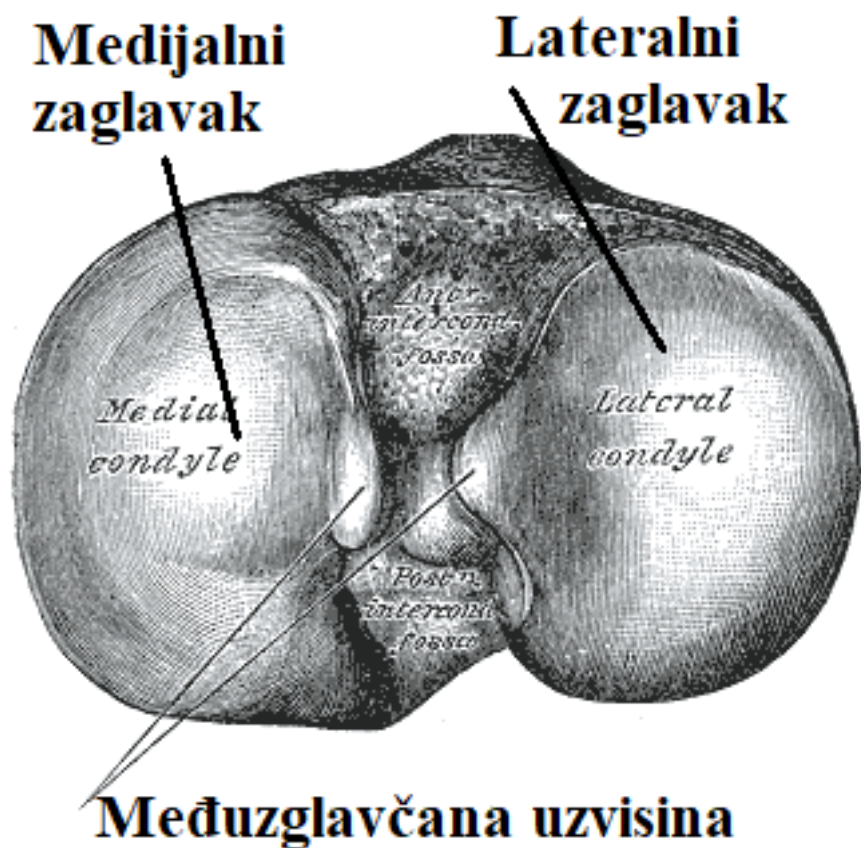
Goljениčnu kost možemo podijeliti na tri dijela:

- Gornji kraj,
- Vrat,
- Donji kraj.



**Slika 4. Goljениčna kost ili tibia [6]**

Sastavni dio zgloba koljena je gornji ili proksimalni dio goljениčne kosti. Sastoji se od medijalnog i lateralnog zaglavka, koje međusobno razdvaja međuzglavčano područje. [4]



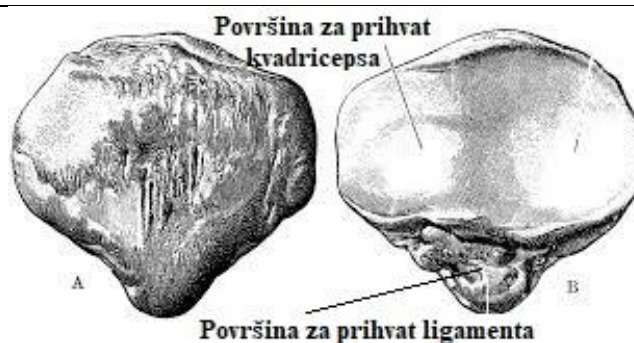
Slika 5. Pogled odozgo na proksimalni dio goljenične kosti [7]

U međuzglavčanom području, kvržica lateralnog te kvržica medijalnog zaglavka zajedno tvore međuzglavčanu uzvisinu. Međuzglavčano područje zajedno sa lateralnim i medijalnim zaglavkom čini plato goljenične kosti ili tibijin plato, na koji se vežu meniskus i križni ligamenti. [4]

### 2.1.3. Iver ili patela

Kost ivera je najveća kost iz skupine sezamskih kosti u tijelu čovjeka, a nalazi se unutar tetive četveroglavog mišića ili kvadricepsa. [4]





**Slika 6. Iver ili petela [8]**

S prednje strane, iver možemo podijeliti na tri dijela. Gornja trećina ivera služi za prihvat tetive kvadricepsa. Srednja trećina je ispunjena krvožilnim kanalićima, a donja trećina služi kao prihvat za patelarni ligament. [2]

Sa stražnje strane, Iver se dijeli na dva dijela. Gornje tri četvrtine patele su zglobne hrskavice koje su u dodiru sa femurom. Zglobna hrskavica se dijeli na medijalnu i lateralnu površinu. Donja četvrtina ivera je ispunjena krvožilnim kanalićima i masnim tkivom. [4]

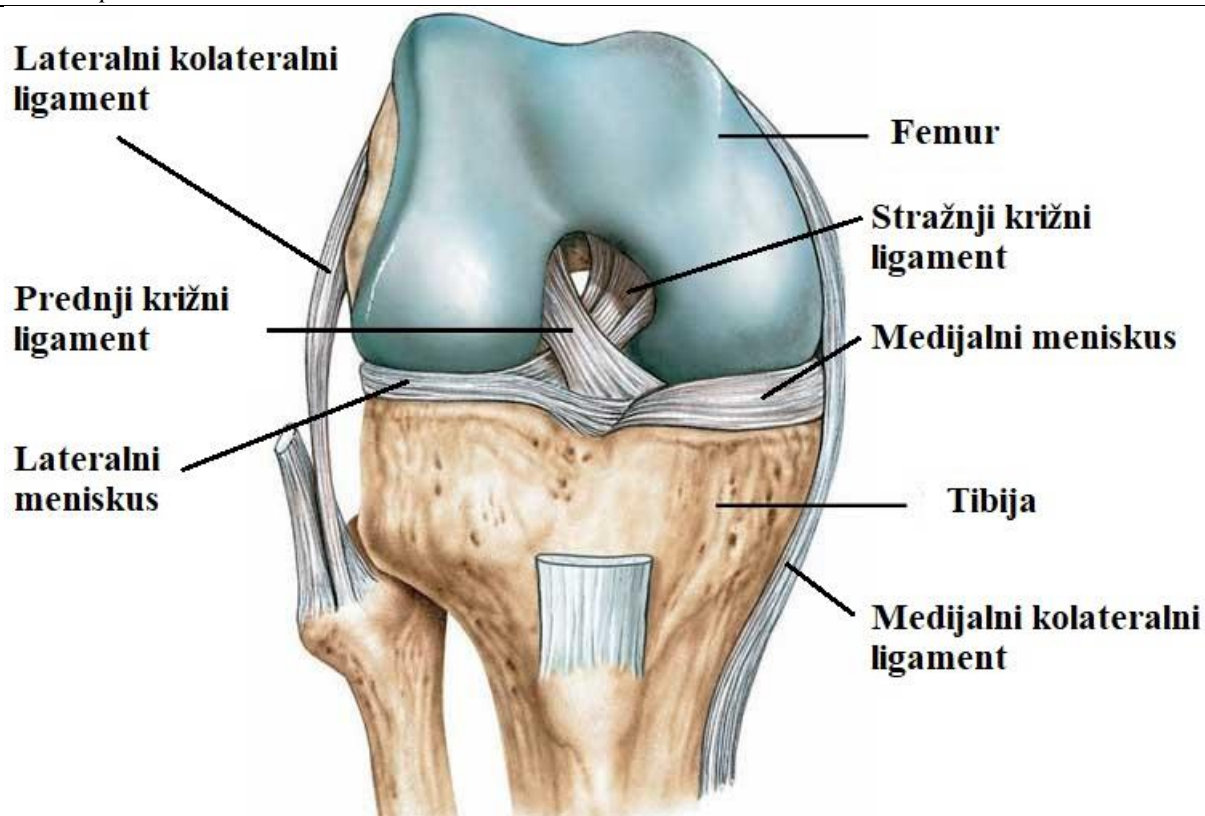
## **2.2. Ligamenti u koljenu**

Stabilnost koljena u velikoj mjeri ovisi o ligamentima. Oni povezuju kosti u zglobo, osiguravaju njegovu stabilnost, te sprječavaju prekomjerno gibanje zgloba. [1]

U zglobo koljena se nalaze četiri ligamenta, a djeluju u parovima tako da svaki onemogućuje određeno prekomjerno gibanje zgloba. Unutar zgloba koljena nalaze se prednji i stražnji križni ligament, a izvan zgloba koljena nalaze se lateralni i medijalni kolateralni ligament. Uz glavne ligamente, u zglobo koljena se nalaze i meniskusi, dodatne sturkture mekog tkiva koje također poboljšavaju stabilnost koljena. Patelofemuralni zglob također ima jedan ligament, naziva patelarni ligament [2]

### **2.2.1. Križni ligamenti**

Dva križna ligamenta u sredini zgloba koljena prolaze jedan pored drugog i zajedno tvore oblik križa, od kuda su i dobili ime. [4]



Slika 7. Ligamenti u koljenu [9]

Prednji križni ligament djeluje u posteolateralnom smjeru, krećući od prednje strane međuzglavčane uzvisine tibije prema medijalnoj strani lateralnog zaglavka femura. Stražnji križni ligament djeluje u anteromedijalnom smjeru, krećući od stražnje strane međuzglavčane uzvisine tibije prema lateralnoj strani medijalnog zaglavka femura. Primarne uloge prednjeg i stražnjeg križnog ligamenta jesu sprječavanje prednjeg i stražnjeg klizanja tibije. Budući da je tibijin plato relativno ravan, oni održavaju čvrstoću zgloba kada mišićne sile nastoje translirati tibiju na femur. Križni ligamenti također onemogućuju aksijalnu rotaciju tibije, pri čemu prednji križni ligament onemogućuje unutarnju rotaciju, a stražnji križni ligament vanjsku rotaciju. [4]

Prednji križni ligament je ligament koljena koji se najčešće ozljeđuje kod sportaša. Nadalje, situacije u kojima se ozljeđuje najčešće ne uključuju fizički kontakt. [4]

### 2.2.2. Kolateralni ligamenti

Medijalni i lateralni kolateralni ligamenti leže izvan zglobne kapsule, na medijalnom i lateralnom dijelu koljena. [4]

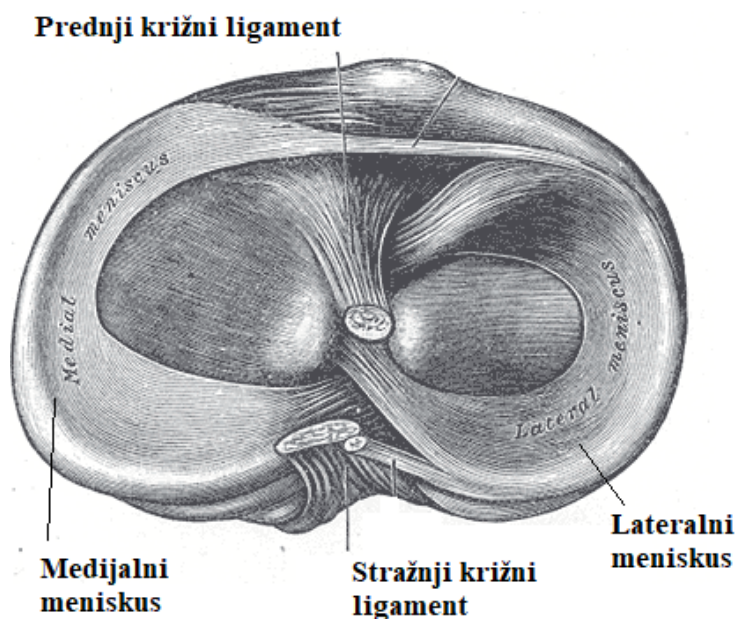
Medijalni kolateralni ligament se proteže od medijalnog epizaglavka femura do medijalnog zaglavka tibije, a lateralni kolateralni ligament od lateralnog epizaglavka femura do glave fibule. Zajedno, ova dva ligamenta osiguravaju koljeno od hiper ekstenzije. Individualno, medijalni kolateralni ligament onemogućuje prekomjernu abdukciju koljena, a lateralni kolateralni ligament sprječava prekomjernu adukciju koljena. [4]

Medijalni i lateralni kolateralni ligamenti se tokom sportskih aktivnosti, najčešće ozljeđuju uz fizički kontakt s drugom osobom. [4]

### 2.2.3. Meniskusi

Meniskus je vezivno-hrskavično tkivo C-oblika i nalazi se na tibijinom platou. Postoje dva meniskusa, lateralni meniskus i medijalni meniskus. Meniskusi se vežu na međuzglavčano područje tibije, točno između kvržica lateralnog i medijalnog zaglavka goljenične kosti, a prema sredini nisu vezani. [4]

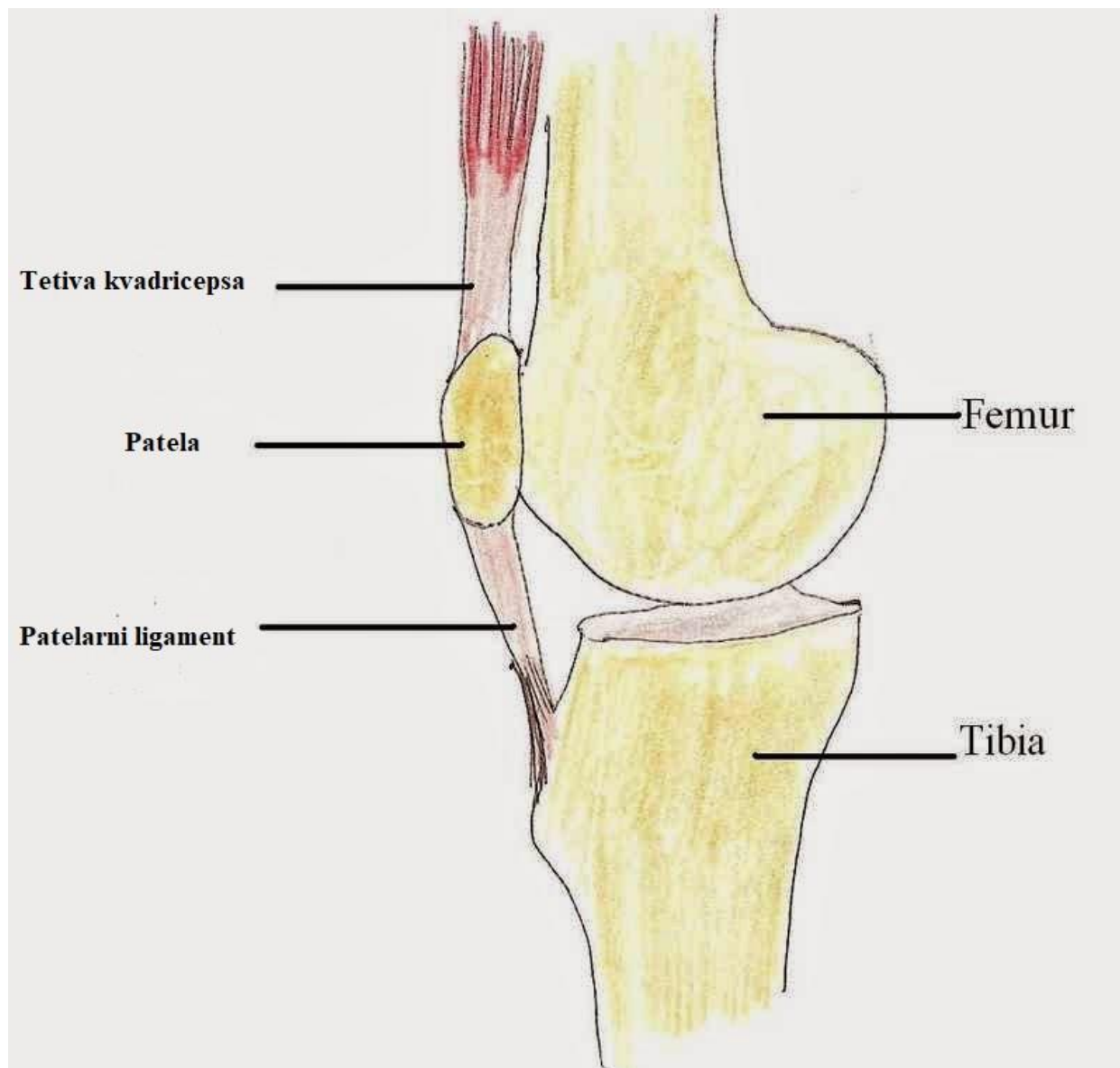
Meniskusi su na dnu plosnati, a na vrhu konkavni. Takav njihov oblik, obzirom da su distalni kraj femura i proksimalni kraj tibije konveksni, povećava čvrstoću koljena. Primarna uloga meniskusa je povećanje površine nalijeganja između femura i tibije, kako bi se smanjio tlak nastao uslijed djelovanja težine tijela. Još jedna bitna uloga meniskusa je smanjenje trenja unutar zgloba prilikom kretanja. [4]



Slika 8. Meniskusi [10]

#### 2.2.4. Patelarni ligament

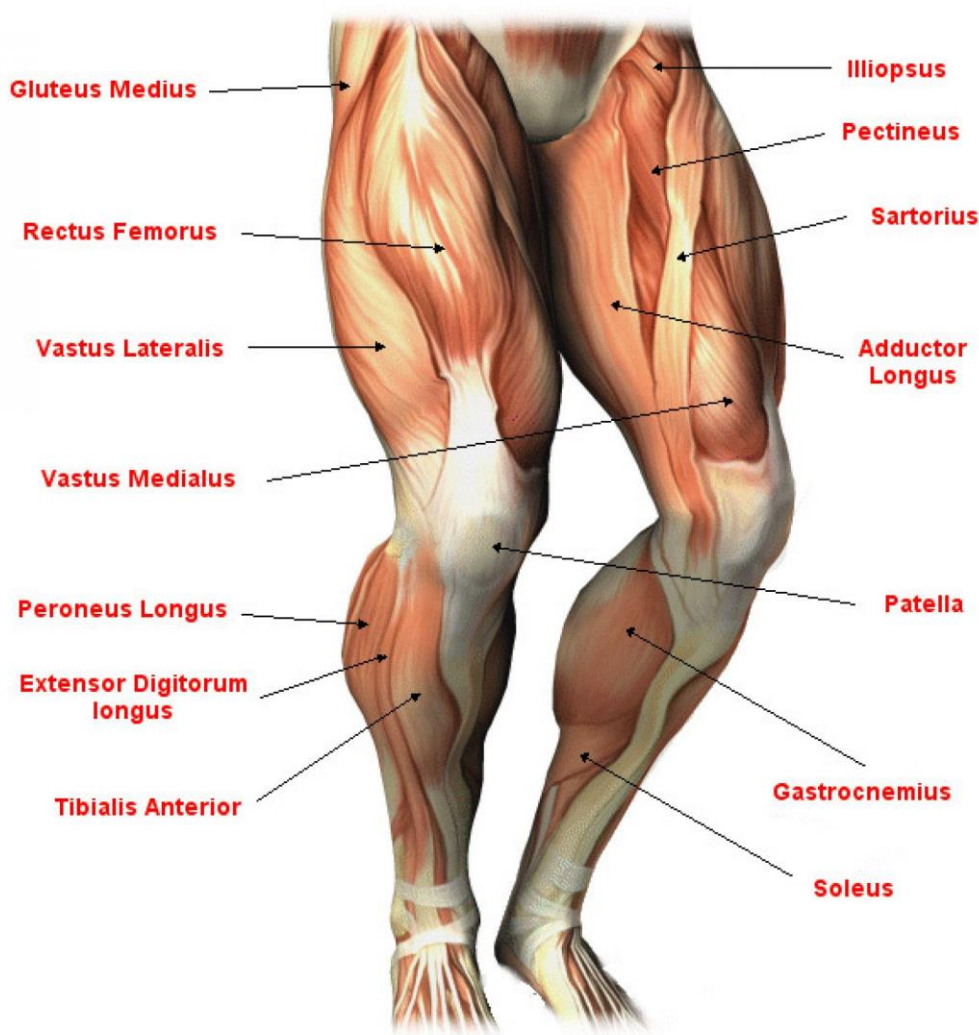
Patelofemuralni zglob je drugačiji od tibiofemuralnog po tome što je patela sezmojska kost, te leži unutar tetive kvadricepsa. Tetiva kvadricepsa prelazi preko zgloba koljena kako bi se zakačila na tibiju. Dio tetive koja se nalazi između kvadricepsa i patele se naziva tetiva kvadricepsa, a dio koji se nalazi između patele i tibije naziva se patelarni ligament. [2]



Slika 9. Patelarni ligament [11]

### 2.3. Mišići koji utječu na rad koljena

Mišići oko koljena su zaduženi za fleksiju i ekstenziju zgloba, kao i za dinamičku stabilizaciju zgloba tijekom raznih aktivnosti. Ti mišići djeluju ekscentrično i izometrijski, kao i koncentrično. Grupa mišića na prednjem dijelu bedra, quadriceps femoris, je zadužena za ekstenziju koljenog zgloba. Grupa mišića na stražnjoj strani bedra, Zadnja loža, zadužena je za fleksiju koljena. [4]



Slika 10. Mišićne skupine koje utječu na rad koljena [12]

Mišići u koljenu koji sudjeluju u ekstenziji su:

- Articularis genus,
- Quadriceps femoris,
- Vastus lateralis,

- Vastus intermedius,
- Vastus medialis. [1]

Mišići u koljenu koji sudjeluju u fleksiji su:

- Biceps femoris,
- Semitendinosus,
- Semimembranosus,
- Gastrocnemius,
- Plantaris,
- Popliteus. [1]

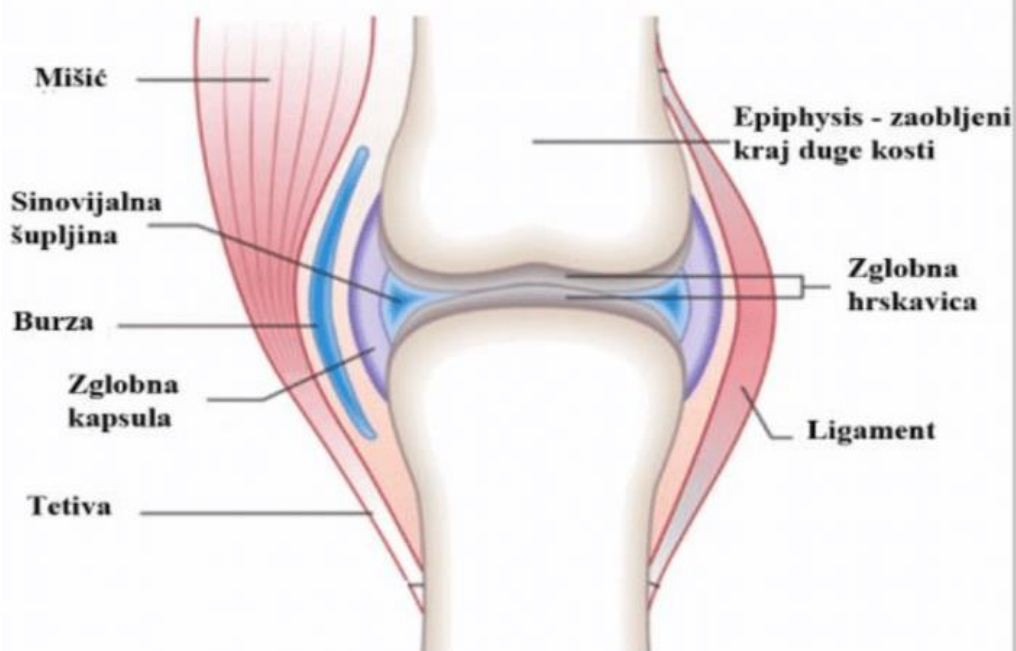
Uloga zgloba koljena tijekom hoda predstavlja dobar primjer višenamjenske uloge mišića koljena, koji su podvrgnuti koncentričnoj i ekscentričnoj kontrakciji tijekom različitih faza ciklusa hoda. Tijekom faze oslonca, koljeno je savijeno, međutim dolazi do tendencije da se koljeno nastavlja savijati, te na kraju propadne uslijed djelovanja težine tijela. Kako bi se to spriječilo, kvadriceps djeluje ekscentrično kako bi se ograničilo savijanje koljena koje se pojavljuje, te kako bi stajna noga ostala stabilna dok na nju djeluje težina tijela. Slično tome, na kraju faze njihanja, kada se koljeno rasteže i omogući postavljanje noge ispred tijela, Zadnja loža djeluje ekscentrično kako bi smanjila brzinu kojom se koljene rasteže i spriječila hiperekstenziju koljena. U završnoj fazi oslonca, te u početnoj fazi njihanja, zadnja loža djeluje koncentrično kako bi savila koljeno i pripremilo ga za fazu njihanja. [4]

## 2.4. Zglob koljena

Koljeno povezuje natkoljenicu s potkoljenicom, a građen je od dva zglobova. Patelofemuralni zglob povezuje patelu i femur, a tibiofemuralni zglob povezuje femur i tibiju. Koljeno je najveći i jedan od najvažnijih zglobova u ljudskom organizmu. Ima najvažniju ulogu u prenošenju težine tijela u horizontalnom smjeru hodanjem ili trčanjem, te u vertikalnom smjeru skakanjem. [13]

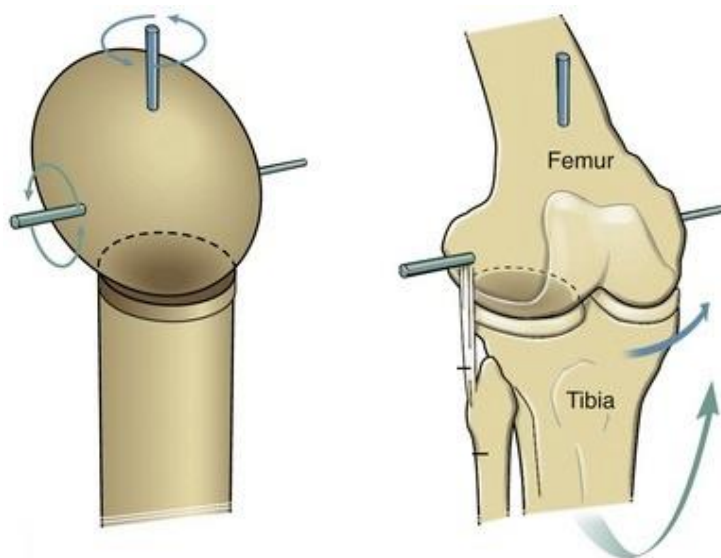
Prema pokretljivosti, zglob koljena pripada skupini pokretnih zglobova. Zglobne površine su pokrivene zglobnom hrskavicom, a unutar zglobne kapsule nalazi se sinovijalna tekućina. Ona je zaslužna za značajno smanjenje trenja unutar zgloba koljena. [1]





Slika 11. Zglob koljena [14]

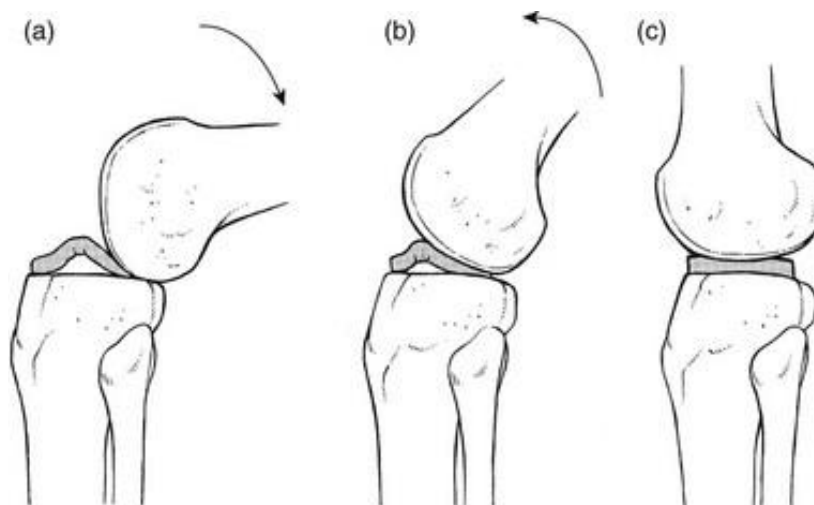
Prema obliku zglobne plohe, koljeno je modificirani cilindrični zglob. Vidi sliku 15. . Modificirani jest iz razloga što osim fleksije i ekstenzije, koljeni zglob omogućuje blagu unutarnju i vanjsku rotaciju. [1]



Slika 12. Zglob koljena [15]

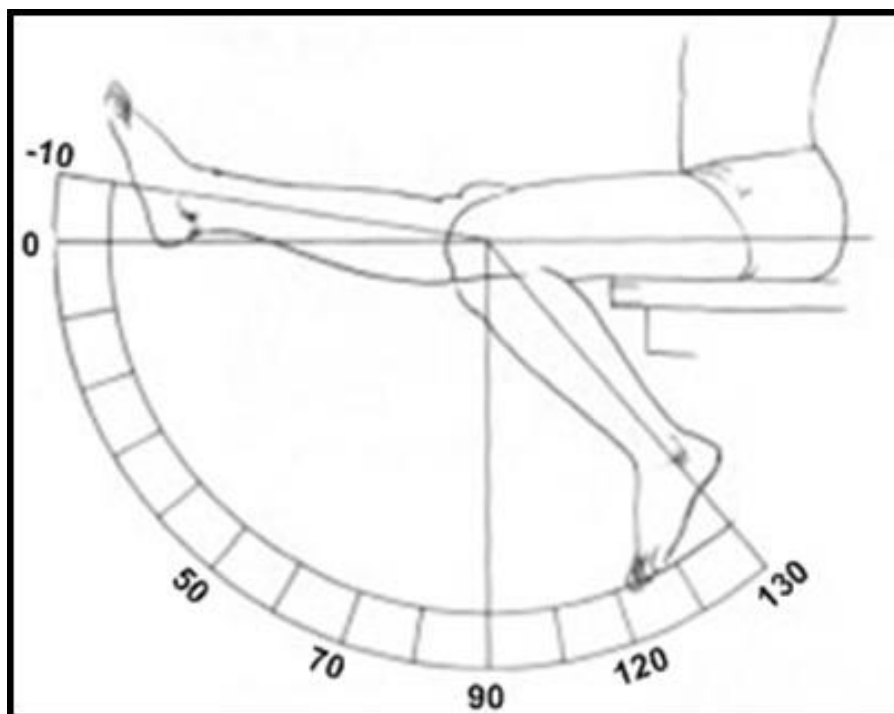
Koljeno dopušta fleksiju i ekstenziju na virtualnoj poprečnoj osi, kao i laganu medijalnu i lateralnu rotaciju oko osi donjeg dijela nogu u savijenom položaju. Zglob koljena se naziva

pokretnim jer se femur i lateralni meniskus premještaju preko tibije tijekom rotacije, a femur kotrlja i klizi preko oba meniskusa tijekom pokreta ekstenzije i fleksije. [4]



**Slika 13. Klizanje femura po tibiji [16]**

Obično, koljeno ima raspon pokreta od oko  $140^\circ$  za pokret fleksije i ekstenzije. Otprilike  $10^\circ$  otpada na hiperekstenziju, a  $130^\circ$  na fleksiju. Ukupni raspon gibanja ovisi o nekoliko parametara, kao što su ograničenja mekih tkiva, mišićna aktivnost i napetost. [4]



**Slika 14. Raspon fleksije i ekstenzije koljena [17]**



### 3. SPORTSKE OZLJEDE KOLJENA

U današnje vrijeme, natjecateljski ali i rekreacijski sport u sve većoj mjeri postaje sastavni dio svakodnevnog života. Svakodnevna tjelesna aktivnost je pogodna za zdravlje, a medicinski stručnjaci procjenjuju da redovita tjelesna aktivnost smanjuje rizik od pojave kroničnih bolesti poput povišenog krvnog tlaka, bolesti srca, raka debelog crijeva, dijabetesa, kao i bolesti kardiovaskularnog sustava. Tjelesna aktivnost je također lijek za psihološke poremećaje i značajno smanjuje pojavu anksioznosti ili depresije. Jedina suprotnost navedenim zdravstvenim prednostima jest povećan rizik od ozljeda tijekom tjelesnih aktivnosti. Postoji opasnost od nezgode ili ozljede muskuloskeletnog sustava, uključujući oštećenja mišića, fraktura, napuknuća tetiva i ligamenata, te ozljeda živaca. Ozljede se mogu dogoditi sportašima ili rekreativcima svih dobnih skupina. [18]

#### 3.1. Unutarnji i vanjski uzroci ozljeda

Vrsta ozljede ovisi o brojnim međusobno zavisnih čimbenika koji se mogu podijeliti u dvije skupine glavnih uzroka ozljede:

- Vanjski uzroci,
- Unutarnji uzroci. [18]

##### 3.1.1. Vanjski uzroci

Vanjski uzroci su povezani sa samim sportom i okolinom u kojoj se sport prakticira. [18]

U okolinu možemo svrstati mjesto na kojemu se sport odvija (dvorana, nogometno igralište, bazen), vremenske uvjete (kiša, snijeg, sunce, temperatura i tlak zraka) ili konfiguraciju podloge (umjetna trava/prirodna trava, led/duboki snijeg, šuma/asfalt). Na primjer, povećanjem koeficijenta trenja između obuće i podloge kako bi se povećala efikasnost sportaša, dolazi do povećanja rizika od puknuća prednjeg križnog ligamenta. [18]

Uz sami sport možemo svrstati je li sport kontaktni ili bezkontaktni, tj. sadrži li duel igru. Veliku ulogu igra i oprema koja se koristi za određeni sport. Dobra sportska oprema igra

veliku ulogu u prevenciji sportskih nesreća i ozljeda nastalih zbog prenaprezanja. Na primjer, korištenjem tenisica koje su predviđene točno za određeni sport i napravljene za točno određeni tip podloge, te u istoj mjeri odgovaraju korisnikovoj težini i obliku stopala, znatno se smanjuje rizik od razvoja muskuloskeletnih problema. U sportu kao što je biciklizam često dolazi do ozljeda koljena zbog prenaprezanja. Kako bi se to spriječilo, preporučljivo je izraditi bicikl prema individualnim morfološkim osobinama pojedinca. [18]

### **3.1.2. Unutarnji uzroci**

U unutarnje uzroke ubrajamo biološke i anatomske karakteristike pojedinca, kao i spol, dob i stupanj razvoja adolescenata. [18]

Velik broj ozljeda događa se upravo u periodu rane adolescencije. U toj dobi, djeca su željna dokazivanja i odlučuju se na puno veće rizike nego što jesu ranije. Nadalje, u pubertetu se djeca razvijaju i fizički i psihički. Primjerice, dječaci počinju izgrađivati mišićnu masu, a djevojčice počinju vezati zalihe energije. Takve promjene zahtjevaju motoričku readaptaciju, što može rezultirati nepravilnim fizičkim kretanjem ili nespretnošću, koji povisuju rizik od ozljede. [18]

Postoje značajne razlike između spolova kada su ozljede u pitanju. Muškarci imaju veći rizik od teških ozljeda, a žene su više pogođene prenaprežanjem. Hormoni predstavljaju najveću razliku između spolova kada je u pitanju rizik od ozljede. Brojna istraživanja ukazala su na to da rizik od puknuća prednjeg križnog ligamenta u različitim sportovima, nije isti za oba spola. Vidi tablica 1. [18]

Studija	Sport	Broj žena u 100 000	broj muškaraca u 100 000	Omjer Ž/M
Myklebust et al. (1998)	Rukomet	82	31	2,65
Prodromos et al. (2007)	Košarka	29	8	3,6
	Nogomet	32	12	2,77
	Rukomet	56	11	5,1
	Borilački sport	77	19	4,01
Parkkari et al. (2008)	Svi sportovi	30	96	0,3125

**Tablica 1. Usporedba spolova za puknuće prednjeg križnog ligamenta po različitim sportovima [18]**

Prednji križni ligament u sebi sadrži hormonske receptore, uglavnom za estrogen, progesteron, testosteron i relaksin. Istraživanje koje je proveo Wojtys pokazuje kako učestalost ozljede prednjeg križnog ligamenta nije konstantan tijekom menstrualnog ciklusa. Puno su veće šanse za puknuće tijekom predovulatorne faze. Kod žena je u više od 50% ozljeda uzrok bezkontaktna igra, dok je kod muškaraca u 45% ozljeda posljedica duel igre ili prekršaja protivničkog igrača. [18]

Značajno povećanje u intenzitetu treninga, promjena sporta ili samo promjena tehnike igranja sporta mogu dovesti do ozljede ako trening i način života nisu u skladu sa zahtjevima sporta. Kako bi se smanjio rizik od ozljeda, sportaši bi trebali prakticirati kvalitetne treninge, uz dovoljnu količinu vremena za oporavak, te bi trebali slijediti zdrav način života. Trening treba slijediti stroge kriterije za prilagodbu, napredak i oporavak. Treningu treba predhoditi dugotrajno zagrijavanje koje je prilagođeno specifičnom sportu. Zagrijavanje priprema tijelo za kardiovaskularne, plućne, mišićne, pa čak i psihološke napore koji slijede. Mišići, organi i zglobovi će također biti opskrbljeniji kisikom i hranjivim tvarima kada pravi napor započne. Oporavak je neophodan jer dopušta tijelu da se postupno vraća u stanje odmora. Nažalost, ova faza je često prekratka ili čak nepostojeća. [18]

### 3.2. Najčešće ozljede koljena u sportu

#### 3.2.1. Ozljeda prednjeg križnog ligamenta

Uobičajeno, puknuće prednjeg križnog ligamenta nastupa kao posljedica valgusnog opterećenja u kombinaciji s vanjskom rotacijom tibije ili kao posljedica hiperekstenzije koljena u kombinaciji s unutarnjom rotacijom tibije. Ozljede prednjeg križnog ligamenta koje nisu posljedica kontakta s drugom osobom, obično se događaju kada se stopalo ukopa na tlu, s tibijom u vanjskoj rotaciji, te koljenom blizu punog istegnuća. Takav položaj većinom rezultira kolapsom koljena u daljnji valgus. Još gori scenarij nastupa ako se na koljeno u tom položaju primjeni vanjska sila. Takva se ozljeda naziva kontaktnom. Kontaktne ozljede karakteristične su za sportove kao što su nogomet, američki nogomet, futsal. [19]



Slika 15. Puknuće prednjeg križnog ligamenta: a) bez vanjske sile, b) uz vanjsku silu

Puknuće prednjeg križnog ligamenta nastalo kao posljedica hiperekstenzije koljena i unutarnje rotacije tibije nije tako učestalo, ali dominira kada koljeno naglo ode u hiperekstenziju povodom lošeg doskoka. [19]



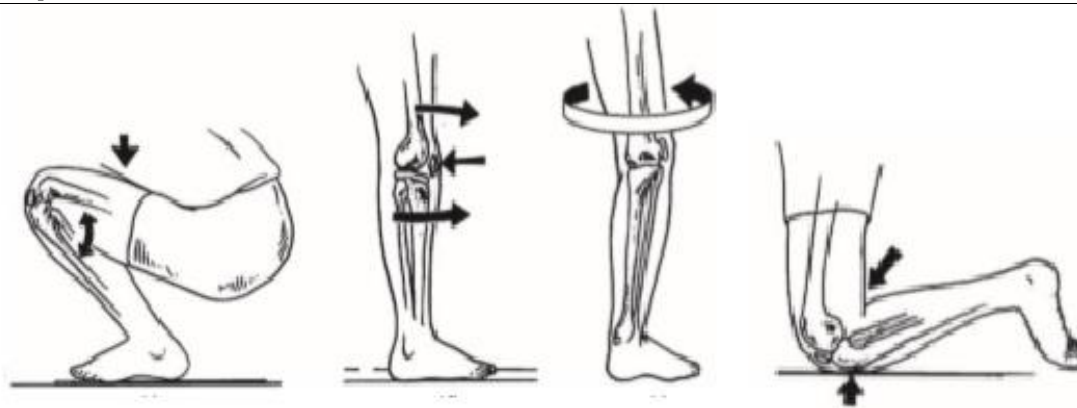
**Slika 16. Puknuće prednjeg križnog ligamenta kao posljedica hiperekstenzije koljena [20]**

U alpskom skijanju postoji više mehanizama ozljede prednjeg križnog ligamenta o kojima je više u 4.poglavlju. [19]

Ozljeda prednjeg križnog ligamenta može biti izolirana ozljeda, ili se može dogoditi s oštećenjem neke druge strukture koljena. Primjer takve kombinirane ozljede poznat je pod nazivom nesretna trijada, u kojoj su zajedno oštećeni prednji križni ligament, medijalni kolateralni ligament i medijalni meniskus tijekom valgus rotacije. [19]

### **3.2.2. Ozljeda stražnjeg križnog ligamenta**

Mehanizmi ozljede stražnjeg križnog ligamenta povezani su s njegovom ulogom u ograničavanju stražnjih pokreta tibije u odnosu na femur, a sekundarno ograničavanjem hiperfleksije i hiperekstenzije, te stabilizacijom femura. Slika prikazuje mehanizme ozljeda stražnjeg križnog ligamenta u sportu. [19]



**Slika 17. Mehanizmi puknuća stražnjeg križnog ligamenta [2]**

Većina ozljeda stražnjeg križnog ligamenta uključuje posteriorno usmjerenu silu na tibiju. Razina sile koja se prenosi na stražnji križni ligament ovisi o kutu fleksije koljena. Što je veći kut fleksije, veća je i prenešena sila na stražnji križni ligament. [19]

### **3.2.3. Ozljeda meniskusa**

Ozljeda meniskusa najčešće proizlazi kad se meniskus podvrgne kombinirano fleksiji i rotaciji ili ekstenziji i rotaciji. Takvi pokreti stvaraju smične sile između tibijalnih i femuralnih zaglavaka. Po strukturi, medijalni meniskus ima pet puta veću vjerojatnost da će biti ozljeđen nego lateralni meniskus. Ozljede meniskusa su povezane sa određenim sportovima. U nogometu ili američkom nogometu, igrači se često sudare ili uđu u duel s protivničkim igračem, te u sudaru izgube ravnotežu i padnu u smjeru za koji nisu očekivali dok su im kopačke ostale zaglavljene u travi ili umjetnoj travi, što dovodi do ozljede meniskusa. U atletici, do ozljede meniskusa često dolazi u disciplini bacanja diska zbog torzije na koljeno. Ozljede meniskusa u alpskom skijanju dolaze nakon nagle i neočekivane torzije koljena. [19]





Slika 18. Ozljeda meniskusa u američkom nogometu [21]

#### 3.2.4. Ozljeda kolateralnih ligamenata

Ozljede oba ligamenta, najčešće su posljedica iznenadnog i nasilnog opterećenja na koljeno, u kojima više strada medijalni kolateralni ligament. Napuknuće medijalnog kolateralnog ligamenta nastupa uslijed sile na lateralnu stranu koljena koja prouzročuje valgus rotaciju i vlačno opterećuje medijalni kolateralni ligament. Medijalni kolateralni ligament najbolje opire valgus opterećenju pri fleksiji 25–30°. Napuknuće lateralnog kolateralnog ligamenta najčešće uzrokuje varus rotacije, koja je često u kombinaciji s hiperekstenzijom koljena. [19]

Ovakve se ozljede najčešće javljaju u sportskim aktivnostima kao posljedica kontakta. Na primjer, lateralni kolateralni ligament se može ozlijediti prilikom teškog prekršaja sa strane u američkom nogometu, kada noge igrača na kojem je prekršaj napravljen ostanu zaglavljene među suigračima koji leže na podu. Kako igrač koji vrši prekršaj pomiče tijelo igrača na kojem radi prekršaj u jednu stranu dok mu je koljeno zaglavljeno, dolazi do jakog opterećenja

na lateralni kolateralni ligament. Ako je opterećenje veće od vlačne čvrstoće lateralnog kolateralnog ligamenta, dolazi do pucanja ligamenta. [19]



**Slika 19. Puknuće kolateralnog ligamenta u američkom nogometu [22]**



## **4. BIOMEHANIČKA ANALIZA OZLJEDE PREDNJEG KRIŽNOG LIGAMENTA U ALPSKOM SKIJANJU**

Alpsko skijanje je relativno siguran sport. Međutim, skijaški vezovi kruto povezuju pancericu sa skijom, te se duga skija ponaša kao poluga preko koje se sile prenose na donje ekstremitete, što često dovodi skijaše u opasnost od ozljede. [23]

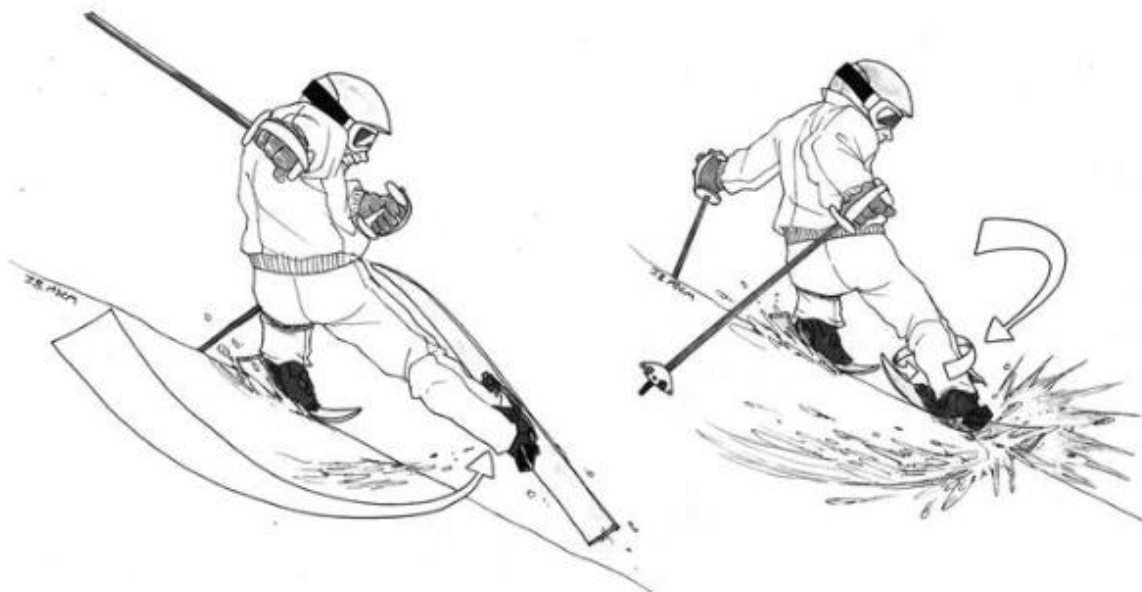
Postoje pet glavnih mehanizama, zbog kojih dolazi do puknuća prednjeg križnog ligamenta u alpskom skijanju:

- Prednji ladični mehanizam uzrokovan oblikom pancerice,
- Valgus – vanjska rotacija,
- Unutarnja rotacija dok je noga ravna (slip-catch),
- Snažna kontrakcija kvadricepsa,
- Mehanizam fantomskog stopala. [23]

### **4.1. Puknuće prednjeg križnog ligamenta izazvano slip-catch mehanizmom**

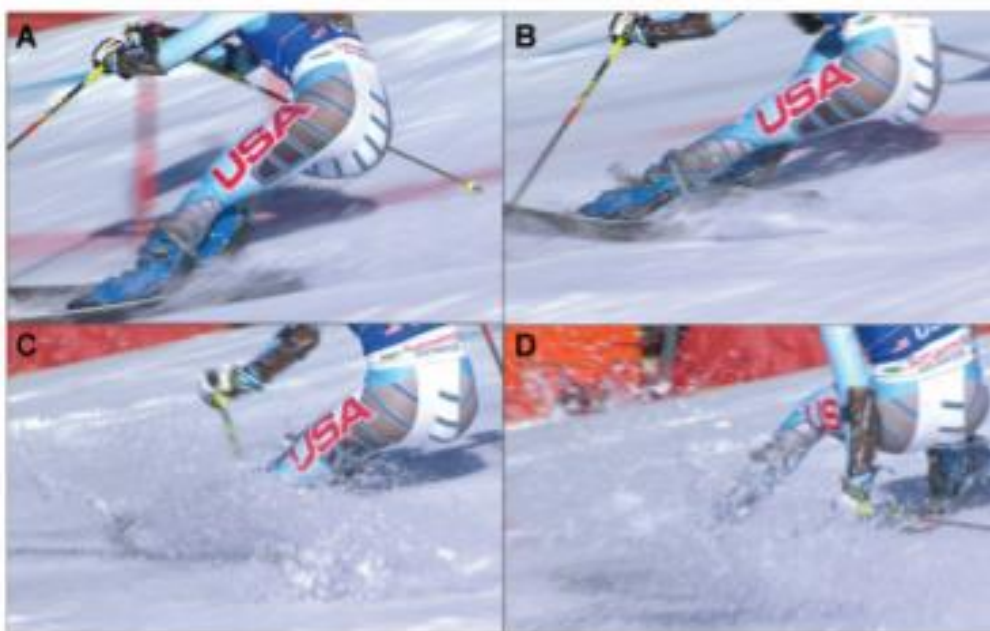
Slip-catch mehanizam je jedan od najčešćih mehanizama ozljede prednjeg križnog ligamenta u alpskom skijanju. [23],[24]

Do ozljede dolazi na slijedeći način: Skijaš ulazi u zavoj, te ga zbog izgubljene ravnoteže tijelo povlači u pad prema nazad ili naprijed. U tom trenutku skijaš gubi kontakt između donje skije i površine. Kako bi izbjegao pad, skijaš ispružuje nogu i svu težinu tijela prebacuje na unutarnji rubnik donje skije u nadi da će ostvariti ponovni kontakt sa snježnom površinom. Do puknuća prednjeg križnog ligamenta dolazi kada unutarnji rubnik na repu donje skije opterećene težinom tijela naglo zahvati snijeg, te koljeno u jako ispruženom položaju opteretiti unutarnjom i valgus rotacijom. [23], [24]



Slika 20. Slip-catch mehanizam ozljede [25]

#### 4.2. Biomehanička analiza Slip-catch mehanizma

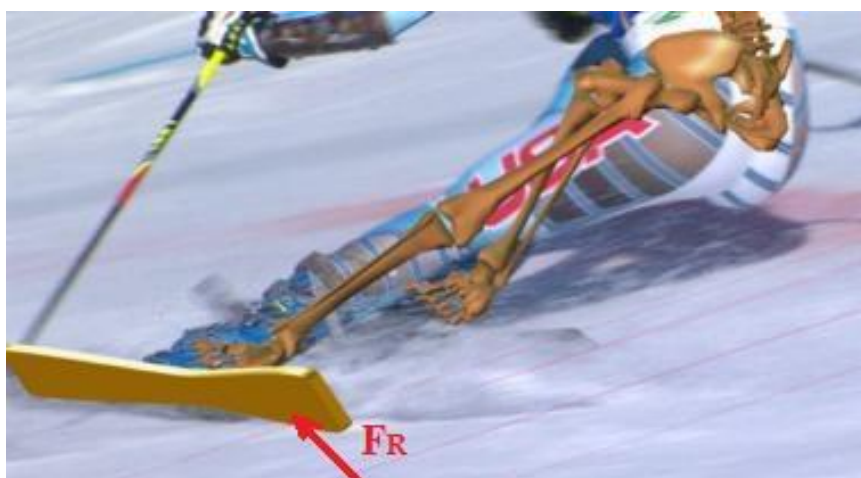


Slika 21. Slip-catch mehanizam ozljede [26]

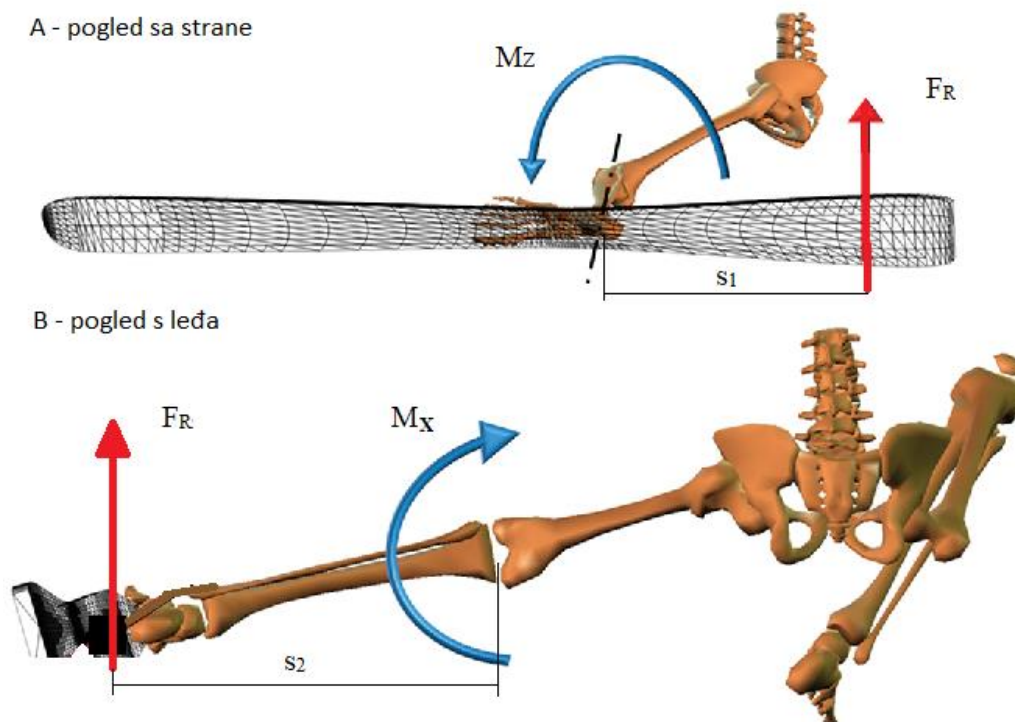
Slika 21. prikazuje Slip-catch mehanizam puknuća prednjeg križnog ligamenta. Na slici A, skijaš ulazi u desni zavoj i polako gubi ravnotežu. U položaju na slici B, skijaš gubi kontakt

sa površinom na lijevoj skiji, te skija bježi od centra mase tijela. Na slici C skijaš ponovo uspostavlja kontakt sa površinom, ali tako što rep lijeve skije naglo zahvati površinu. U trenutku C dolazi do puknuća prednjeg križnog ligamenta. Na slici D skijaš pada unatrag na lijevu stranu. [26]

U trenutku C kada rep donje skije naglo zahvati snijeg, javlja se reakcija površine na skiju  $F_R$  kao što prikazuje Slika 22. [26]



Slika 22. Sila reakcije površine na rep skije [26]



Slika 23. Sila reakcije površine na skiju koja uzrokuje momente u koljenu [26]

Slika 23. prikazuje sile i momente koji se javljaju pri slip-catch mehanizmu. Udaljenost  $s_1$  predstavlja udaljenost između sile  $F_R$  na repu skije i vertikalne osi tibije. Sila  $F_R$  na udaljenosti  $s_1$  od vertikalne osi tibije uzrokuje moment  $M_z$  zbog kojeg dolazi do unutarnje rotacije tibije. Sila  $F_R$  na udaljenosti  $s_2$  uzrokuje moment  $M_x$  zbog kojeg dolazi do valgus rotacije koljena. Zbog momenata  $M_x$  i  $M_z$  dolazi do puknuća prednjeg križnog ligamenta, uslijed istovremene valgus i unutarnje rotacije koljena. [26]

#### 4.3. Utjecaj skijaške opreme na clip-catch mehanizam

##### 4.3.1. Utjecaj skija

Moderne skije su konstruirane tako da se njima mogu lagano izvoditi zavoji. Rubnik nije ravan, već ima oblik parabole, pa se oslanjanjem na rubnik može lagano okretati, po različitim radijusima. [23], [24]

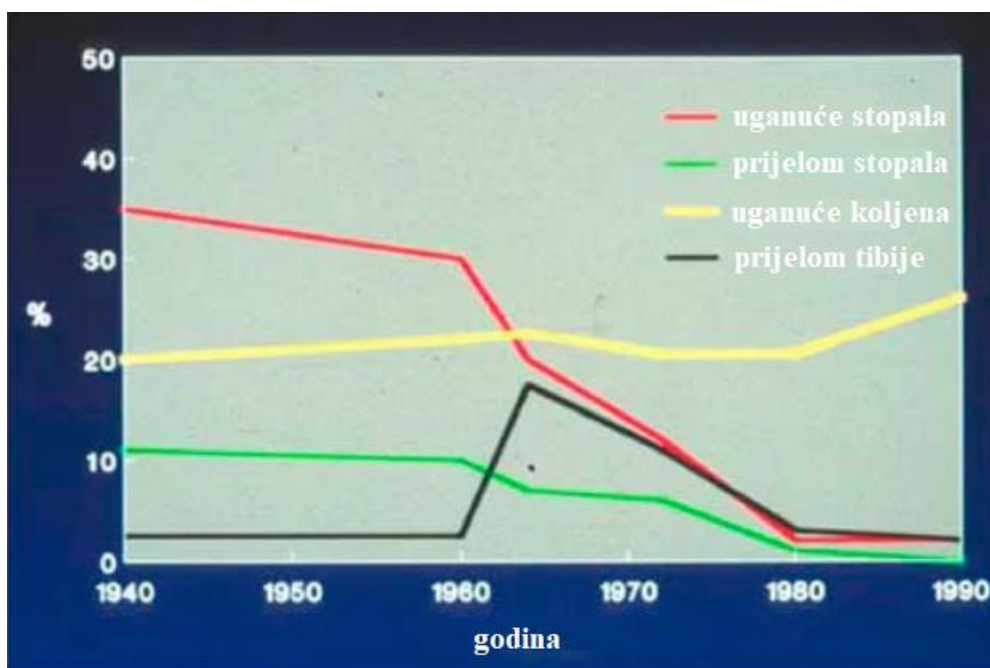


Slika 24. Izgled modernih carving skija [27]

U prethodnom je odlomku ustanovljeno da do puknuća prednjeg križnog ligamenta dolazi poradi unutarnje i valgus rotacije koljena. Takvo je opterećenje posljedica samo-skretanja modernih skija. Kada rubnik skije zahvati snijeg samo na repu, ili samo na vrhu skije, skija se ponaša kao poluga koja zakreće koljeno. [23], [24]

#### 4.3.2. Utjecaj vezova

Konvencionalni vezovi su uspješni pri sprječavanju ozljeda donjih dijelova nogu, za što su primarno i konstruirani. Broj prijeloma tibije i ozljeda stopala se smanjuje kako dolaze poboljšanja s novim modelima vezova. Međutim, broj ozljeda koljena svake godine raste, što je neočekivano u odnosu na razvoj vezova. [28]



Slika 25. Dijagram ozljeda u skijanju kroz godine [28]

Razlog tome leži u činjenici da su vezovi konstruirani tako da smanje mogućnost ozljeda donjih dijela nogu, te nikakvih drugih ozljeda. Vezovi se sastoje od prednjeg i stražnjeg dijela, a svaki dio ima samo jedan stupanj slobode otpuštanja. Prednji dio veza će otpustiti pancericu u lijevu ili desnu stranu ako se pancERICA optereti momentom koji je veći od kritičnog momenta otpuštanja namještenog na vezu. Stražnji dio veza će otpustiti pancericu u vertikalni smjer, u slučaju da se pancERICA optereti horizontalnom silom visoke vrijednosti. [28]



**Slika 26. Mehanizam otpuštanja skijaških vezova [28]**



## 5. KONCEPTUALNO RJEŠENJE ZA PREVENCIJU OZLJEDE PREDNJEG KRIŽNOG LIGAMENTA SLIP-CATCH MEHANIZMOM

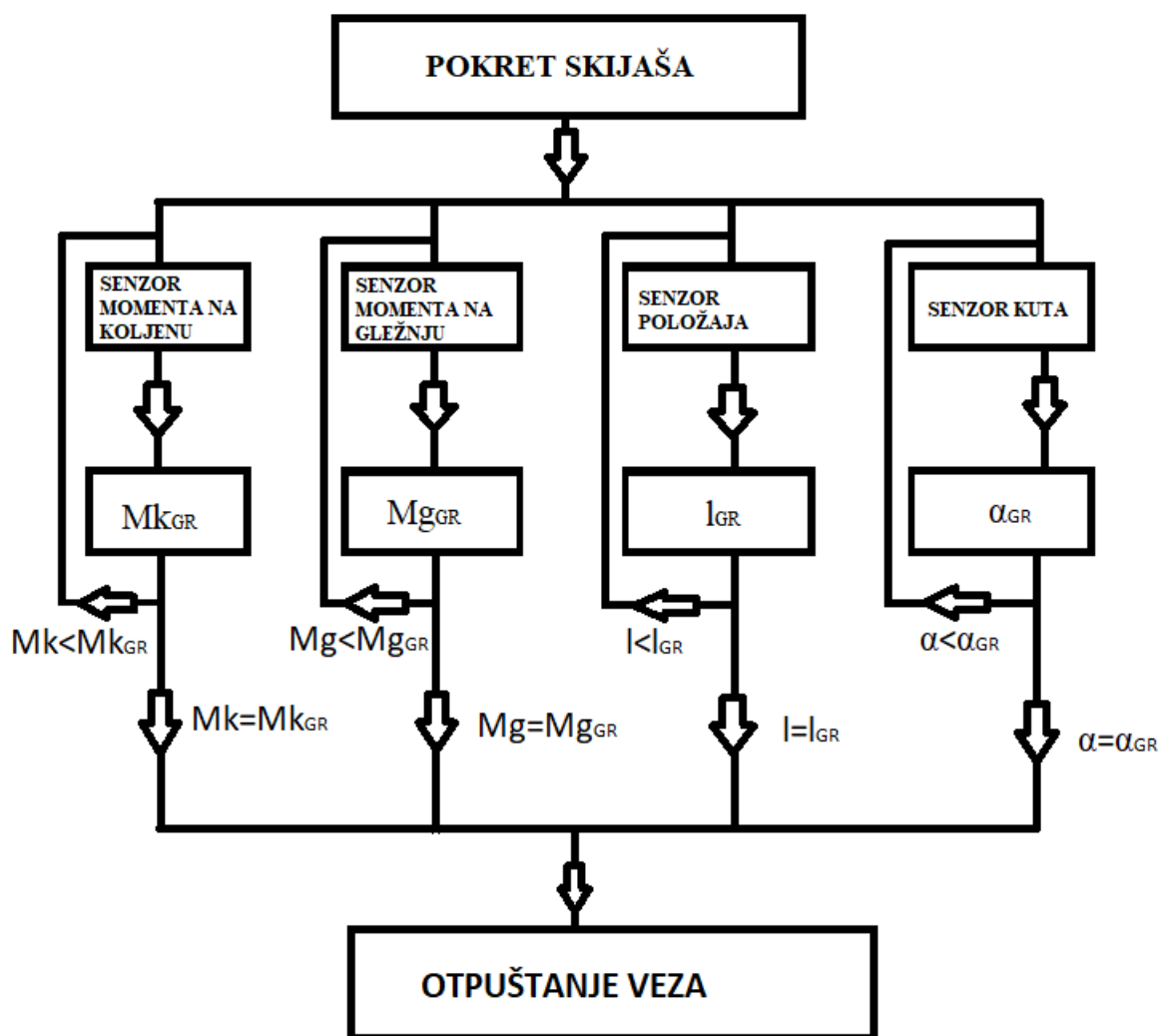
Sportaši su često u želji za što boljim rezultatom spremni ići preko vlastitih granica. Ako sportska oprema ne uspije popratiti te granice, te se pritom dogodi sportaševa pogreška, vrlo često dolazi do teške ozljede. Kada se sagleda ozljeda u cjelosti, puno faktora igra ulogu u ozljedi prednjeg križnog ligamenta u alpskom skijanju slip-catch mehanizmom. Sportaš pri velikoj brzini izgubi ravnotežu, te u želji za uspostavom ponovnog kontakta s površinom ispružuje nogu do krajnjih granica. Ako pritom rep skije naglo zahvati snijeg, sam oblik skije, te reaktivne sile površine, tjeraju koljeno u unutarnju i valgus rotaciju. Ako dođe do te situacije, vezovi ne prepoznaju opasnost, te skijaševa noga ostaje kruto vezana za skiju, nakon čega dolazi do puknuća prednjeg križnog ligamenta. Glavni krivac za ozljedu, osim skijaša i oblika skija na koje se nemože utjecati jest skijaški vez.

### 5.1.1. Skijaški mehatronički sustav



Slika 27. Položaji senzora u konceptualnom skijaškom mehatroničkom sustavu

Na slici 27. prikazan je konceptualni skijaški mehatronički sustav. Crveni kružići označuju senzore položaja na koljenu koji služe za prepoznavanje odmicanja jednog koljena od drugog. Zeleni kružići označuju senzore kuta, a zadaća im je mjerenje kuta između femura i tibije. Senzori momenata postavljaju se na dva mjesta, a na slici su označeni plavom bojom. Prvi se postavlja između gležnja i tibije te mjeri moment koji zakreće tibiju. Drugi senzor momenta se postavlja između tibije i femura a prepoznaje moment koji izaziva valgus rotaciju. Na prsima skijaša postavljen je mikroprocesor. Mikroprocesor obrađuje podatke koje očitava senzor, te odlučuje otpušta li vez tokom skijaševog pokreta ili ne. Algoritam regulacije prikazan je na slici 28.



Slika 28. Algoritam regulacije za skijaški mehatronički sustav



Kao kritični parametri označeni su granični moment u koljenu  $M_{kGR}$ , granični moment u gležnju  $M_{gGR}$ , granični razmak između koljena  $l_{GR}$  i granični kut između femura i tibije  $\alpha_{GR}$ . Mikroprocesor uspoređuje vrijednosti koje prepoznaju senzori sa graničnim vrijednostima kritičnih parametara, te ukoliko sve vrijednosti budu izjednačene s graničnim vrijednostima, dolazi do otpuštanja veza.

Uz malu rekonstrukciju algoritma regulacije te odgovarajuće sportske obuće, ovakav mehatronički sustav primjenjiv je i na druge sportove kod kojih dolazi do puknuća prednjeg križnog ligamenta uslijed rotacije tibije pri ispruženom koljenu. Za konstrukciju realnih uređaja, lako je zaključiti da je potrebno odrediti granične vrijednosti kritičnih parametara koji su uzeti u obzir prilikom analize.

## 6. ZAKLJUČAK

Koljeno je najsloženiji i najveći pokretni zglob u ljudskom tijelu. Zglob koljena je formiran između dviju glavnih dugih kosti u donjem predjelu ljudskog tijela, tibije, koja se proteže između zgloba koljena i zgloba gležnja, i femura, koja leži između zgloba koljena i zgloba kuka. Treća prisutna kost u koljenu je Iver ili patela. Stabilnost koljena u najvećoj mjeri ovisi o ligamentima. U zglobu koljena prisutni su prednji i stražnji križni ligamenti, te lateralni i medijalni kolateralni ligamenti. Meniskus je vezivno-hrskavično tkivo koje je također sastavni dio koljenog zgloba. Glavna uloga meniskusa je prigušenje vibracija i raspodjela tlaka nastalog zbog težine tijela na dodiru femura i tibije. Glavni pokreti koljena jesu fleksija i ekstenzija, a njih ostvaruju mišići.

Zbog svoje složene i kompleksne građe, koljeno je podložno ozljedama. Najviše ozljeda koljena nastane prilikom sportskih aktivnosti, a u sportu postoje razni faktori koji povećavaju rizik od ozljede koljena, mogu se podijeliti na unutarnje i vanjske faktore. Ozljede ligamenata najviše utječu na stabilnost i funkcionalnost zgloba. Prednji križni ligament najčešće pukne uslijed hiperekstenzije koljena uz unutarnju rotaciju tibije ili uslijed valgus rotacije uz vanjsku rotaciju tibije. Većina ozljeda stražnjeg križnog ligamenta nastaje silom koja je posteriorno usmjerena tibiju. Ozljede oba kolateralna ligamenta, najčešće su posljedica iznenadne sile na lateralnu ili medijalnu stranu koljena. Ozljeda meniskusa najčešće nastupa kad se meniskus podvrgne kombinirano fleksiji i rotaciji ili ekstenziji i rotaciji.

U alpskom skijanju postoji pet mehanizama pri kojima dolazi do puknuća prednjeg križnog ligamenta u koljenu: Prednji ladični mehanizam uzrokovan oblikom pancerice, valgus – vanjska rotacija, unutarnja rotacija dok je noga ravna (slip-catch), snažna kontrakcija kvadricepsa, Mehanizam fantomskog stopala.

Nakon izvršene biomehaničke analize za slip-catch mehanizam ozljede, kao glavni uzroci koji dovode do puknuća prednjeg križnog ligamenta ističu se ispruženo koljeno, parabolični oblik modernih carving skija i skijaški vezovi. Obzirom da je skijanje doživjelo revoluciju upravo izumom modernih carving skija, kao jedino logično rješenje za česte ozljede koljena u alpskom skijanju jest rekonstrukcija skijaških vezova zaduženih za zaštitu stopala i tibije.

Razvojem i komercijalizacijom senzora i mikroprocesora, skijaški vezovi se mogu unaprijediti uvođenjem mehatronike. Glavni dijelovi takvog sustava jesu senzori momenta, senzori položaja, senzori kuta i mikroprocesor. Uz pomoć algoritma regulacije, zaključujemo

kako su kritični parametri koje treba odrediti za konstrukciju mehatroničkih skijaških sustava granični moment koji rotira tibiju, granični moment koji uzrokuje valgus rotaciju, granična udaljenost između koljena, te granični kut između femura i tibije. Primjenom algoritma regulacije na druge sportove, te rekonstruiranjem postojeće obuće, može se doći do novih rješenja u vidu smanjivanja ozljeda prednjeg križnog ligamenta u zglobu koljena.

## 7. LITERATURA

- [1] Osnove funkcionalne anatomije, Davor Šentija
- [2] Clare E. Milner: Functional Anatomy for Sport and Exercise, Routledge, 2008.
- [3] [https://www.researchgate.net/figure/Cortical-and-cancellous-bone-in-human-femur\\_fig2\\_259491973](https://www.researchgate.net/figure/Cortical-and-cancellous-bone-in-human-femur_fig2_259491973), Veljača 2018.
- [4] D. R. Peterson, J. D. Bronzino: Biomechanics Principles and Applications, 2008
- [5] <https://memorize.com/femur/>, Veljača 2018.
- [6] <https://memorize.com/tibia/>, Veljača 2018.
- [7] [https://en.wikipedia.org/wiki/Lateral\\_condyle\\_of\\_tibia](https://en.wikipedia.org/wiki/Lateral_condyle_of_tibia), Veljača 2018.
- [8] <https://bonebrokeblog.files.wordpress.com/2013/06/patella.gif>, Veljača 2018.
- [9] <https://www.pogophysio.com.au/blog/repair-my-ruptured-acl/>, Veljača 2018.
- [10] [https://en.wikipedia.org/wiki/Meniscus\\_\(anatomy\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Meniscus_(anatomy)), Veljača 2018.
- [11] <http://lakewass.blogspot.com/2015/05/ultrasound-case-of-day-patella-injuries.html>, Veljača 2018.
- [12] <http://www.xplode-nutrition.com/blog/mi-i-i-zadnjice-i-nogu>, Kolovoz 2018.
- [13] A.Faller, M.Schuenke: The Human Body, Thieme, 2004.
- [14] <https://mobility-health.com/pages/human-anatomy>, Veljača 2018.
- [15] <https://clinicalgate.com/basic-structure-and-function-of-human-joints/>, Kolovoz 2018.
- [16] <https://clinicalgate.com/disorders-of-the-inert-structures-capsular-and-non-capsular-patterns/>, Kolovoz 2018.
- [17] <https://bonesmart.org/forum/threads/march-17-second-tkr-surgery.35972/page-6>, Kolovoz 2018.
- [18] Hermann O. Mayr, Stefano Zaffagini: Prevention of Injuries and Overuse in Sports, Springer, 2016.
- [19] Youlian Hong, Roger Bartlett: Routledge Handbook of Biomechanics and Human Movement Science, Routledge, 2008.
- [20] <https://www.couriermail.com.au/sport/football/manchester-united-v-anderlecht-zlatan-ibrahimovic-injures-his-knee-in-europa-league-quarterfinal/news-story/e418cd379021d7102fada209a5f7be6e>, Kolovoz 2018.
- [21] <https://www.braceaccess.com/common-knee-injuries-football/>, Kolovoz 2018.
- [22] <http://articularcartilage.yolasite.com/>, Kolovoz 2018.

- 
- [23] American College of Sports Medicine: Medicine & Science in Sports & Exercise, 2004.
- [24] The American Journal of Sports Medicine, 39.izdanje, broj 4, 2011.
- [25] <https://radiologykey.com/imaging-of-snow-skiing-and-snowboarding-injuries/#Fig2>, Kolovoz 2018.
- [26] The American Journal of Sports Medicine, 41.izdanje, broj 5, 2013.
- [27] <http://www.palmerskis.com/products/p02-carving/>, Rujan 2018.
- [28] <https://www.newschoollers.com/news/read/All-wanted-ACL-injuries-ski-bindings>, Kolovoz 2018.

## **PRILOZI**

### **I. CD-R disc**